

УДК 62-614

Исьемин Р.Л.¹, Кузьмин С.Н.¹, Зорин А.Т.¹, Вирясов Д.М.¹, Зайченко В.М.²¹Тамбовский государственный технический университет²Объединенный институт высоких температур РАН

О ВЫБОРЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФЛЮИДИЗАЦИИ В СЛОЕ ПРИ СЖИГАНИИ БИОМАССЫ, В ТОМ ЧИСЛЕ, СОВМЕСТНО С УГЛЁМ

Проанализовано недоліки відомих методів діагностики процесів дефлюїдизації в киплячому шарі при спалюванні в ньому біомаси. Запропоновано метод діагностування зазначеного процесу по зміні безрозмірної амплітуди пульсації перепаду тиску в шарі.

Проанализированы недостатки известных методов диагностики процессов дефлюидизации в кипящем слое при сжигании в нем биомассы. Предложен метод диагностирования указанного процесса по изменению безразмерной амплитуды пульсации перепада давления в слое.

Analyzed the shortcomings of known methods of diagnosis processes defluidization in the fluidized bed combustion of biomass in it. Developed method of diagnosing this process to change the dimensionless amplitude of the pulsations of the pressure drop in the bed.

N – количество измерений перепада давления;

p – давление;

S – безразмерный параметр;

t – время;

T – температура;

x – содержание соломенных гранул в смеси;

Δp – перепад давления;

d – безразмерная амплитуда пульсации

перепада давления;

s – отклонение пульсации перепада давления.

Индексы нижние:

i – текущее значение перепада давления;

m – среднее значение;

над – надслоевое пространство;

сл – слой.

Котлы и топочные устройства с кипящим слоем получают все большее распространение из-за возможности эффективного сжигания различных сортов углей (в том числе и низкого качества), биомассы и отходов, причем, с минимальным загрязнением окружающей среды. В котлах такой конструкции за счет возможности поддержания во всем объеме топлива одинаковой температуры, интенсивного отвода тепла с омываемых слоем поверхностей теплообмена, можно избежать образования агломератов и расплавления золы и инертных частиц. Однако это удается далеко не всегда, т.к. некоторые виды биомассы (к примеру, солома и иные отходы растениеводства) имеют очень низкую температуру плавления золы. При сжигании таких топлив, в том числе совместно с углем, в слое образуются крупные агломераты спекшихся частиц топлива, золы и инертного материала. Минимальная скорость псевдооживления для слоя с такими частицами увеличивается, начинается процесс

дефлюидизации слоя, приводящий к полной остановке котла или топки. Более детальный анализ процесса дефлюидизации можно найти в работах [1–3]. Кроме того, оказывается, что, если данный вид биомассы (к примеру, соломы) при сжигании в кипящем слое способен образовывать агломераты, то зола этой биомассы отлагается на конвективных поверхностях нагрева, интенсифицируя процессы коррозии [4].

Целью настоящей работы является выбор оптимального метода диагностики процессов дефлюидизации в кипящем слое при сжигании в нем биомассы, в том числе совместно с углем.

Подобная цель ставилась во многих работах, однако, по нашему мнению, эффективных методов диагностики процессов дефлюидизации пока не было предложено.

Так в работе [5] предложено определять начало дефлюидизации по изменениям перепада давления в слое и температуры слоя и надслоевого пространства. В эксперимен-

тальной установке в различных инертных материалах сжигали кору осины влажностью 6,27 %, содержащей 205 мг/г соединений натрия и 3995 мг/г соединений калия. Как видно из рис. 1, дефлюидизация слоя инертного материала начинается примерно через 60 минут после подачи биомассы в слой. Дефлюидизация сопровождается резким ростом температуры слоя (от 870 °С в состоянии нормального псевдооживления до 1000 °С при дефлюидизации). Температура надслоевого пространства при этом практически не меняется. Интересно, что перепад давления в слое начинает снижаться примерно за 30 минут до начала дефлюидизации, определяемой по температуре слоя.

Аналогичные методы по диагностике дефлюидизации в циркулирующем кипящем слое при сжигании в нем соломенных гранул применены в работе [6]. Опыты проводились в экспериментальной установке, топка которой имела диаметр 0,3 м и высоту 7,5 м. Температура слоя менялась в диапазоне от 793 до 843 °С. Дефлюидизация в таком слое наступала через 3,5 часа после начала опыта и сопровождалась резким ростом температуры слоя во всех точках измерения. Затем наблюдалось резкое падение температуры слоя из-за прекра-

щения горения. Возобновление горения было возможно только после удаления агломератов и восстановления подвижности частиц слоя. Очевидно, что полностью удалить агломераты из слоя не удастся, поэтому следующая дефлюидизация наступала уже через 1 час после возобновления опыта.

Рассмотренные выше методы диагностики дефлюидизации позволяют идентифицировать этот процесс тогда, когда он уже принял необратимый характер.

Оригинальный метод диагностики дефлюидизации предложен в работе [7]. В основу метода положено предположение, что все процессы, связанные с перемещением потоков газа и твердых частиц в слое, обусловлены образованием, подъемом и разрушением газовых пузырей, их размерами и частотой, с которой происходит образование и разрушение. Перемещение и разрушение газовых пузырей вызывают колебания перепада давления в слое, которые легко зафиксировать. При изменении фракционного состава частиц слоя, размеры пузырей, частота их образования и разрушения меняются, что отражается на статистических характеристиках случайного процесса изменения перепада давления в слое. Таким обра-

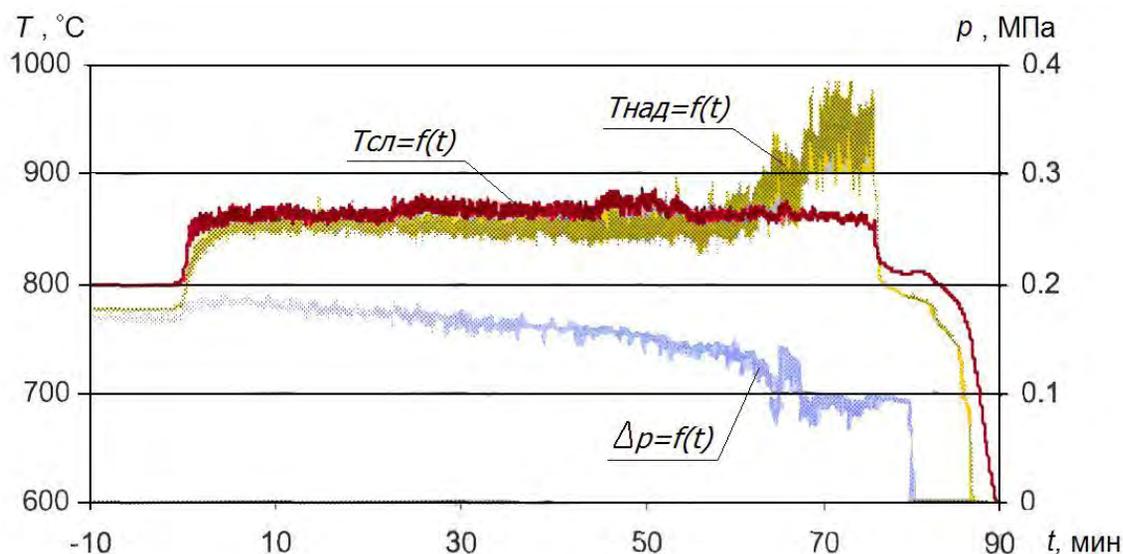


Рис. 1. Изменение температуры слоя, надслоевого пространства и перепада давления в кипящем слое инертного материала при сжигании в нем осинового коры [5].

зом, если в слое будут образовываться агломераты и увеличиваться размер частиц, то это должно найти отражение в изменении упомянутых статистических характеристик. Поскольку изменение фракционного состава слоя происходит непрерывно, то случайный процесс изменения перепада давления в слое не является стационарным и для его анализа предлагается использовать не обычный метод быстрой сходимости рядов Фурье, а метод Вигнера [8]. К сожалению, экспериментальная проверка предложенного метода диагностики проводилась только на так называемой «холодной модели» (при комнатной температуре) со слоем песка (средний диаметр частиц 0,2 мм), в который добавлялись крупные частицы песка (диаметром 1,2 мм). По мнению авторов эти крупные частицы должны исполнять роль агломератов, образующихся при сжигании в кипящем слое биомассы. Было установлено, что действительно, с добавлением крупных частиц в слой мелких, статистические характеристики случайного процесса флуктуации перепада давления в слое значительно меняются, но в том случае, если доля крупных частиц в слое не превышает 20 %, а число псевдооживления не превышает 4.

Результаты анализа процесса флуктуаций перепада давления в слое для диагностики процессов дефлюидизации предложено использовать и в работах [9, 10]. В этих и в ряде других работ излагаются принципы разработанной авторами системы раннего распознавания агломерации (EARS). Согласно этой системе через определенные промежутки времени измеряются пульсации перепада давления в слое, рассчитываются их статистические характеристики, которые сопоставляются с помощью особым образом рассчитываемого критерия S [11]. Если критерий $S < 3$, кипящий слой работает в стационарном режиме, если $S > 3$ – имеют место значительные отклонения в характере флуктуаций перепада давления в слое, которые позволяют говорить о начале дефлюидизации. Система EARS была проверена авторами на «холодной» модели и на

действующем котле с топкой пузырькового и циркулирующего кипящего слоев. Очевиден ряд недостатков предложенной системы: 1) сложность расчета критерия S , 2) зависимость точности функционирования системы от вида сжигаемого топлива. То есть при сжигании одного вида топлива (авторы обозначают его как топливо «А» не указывая его характеристики), действительно, при достижении критерием S значений $S > 3$ в слое начинается процесс дефлюидизации, причем система EARS позволяет диагностировать этот процесс на 40 минут раньше, чем начинается значительный рост температуры слоя. При сжигании же других видов топлива (рис. 2) критерий $S > 3$ в отдельные промежутки наблюдений, но дефлюидизация не наблюдается.

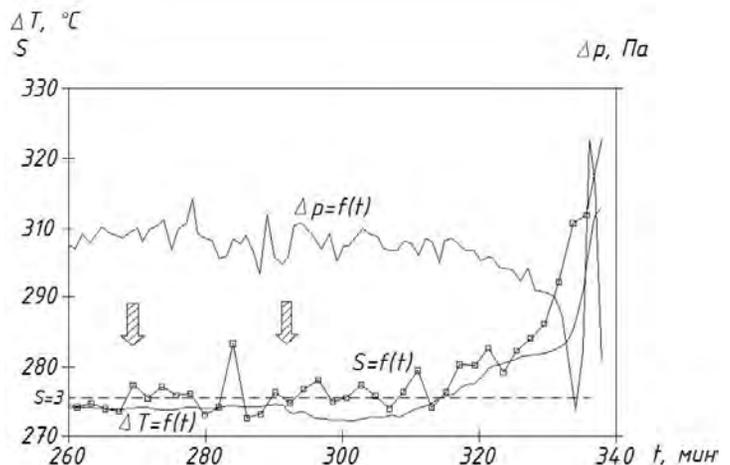


Рис. 2. Эффективность системы EARS при лабораторном псевдооживлении топлива «А».

На наш взгляд диагностика процессов дефлюидизации может быть выполнена на основе анализа флуктуаций перепада давления в слое, но анализ должен быть построен на сравнении легко рассчитываемых характеристик, таких как безразмерная амплитуда пульсации перепада давления в слое.

Нами были проведены эксперименты на «холодной» модели слоя, состоящего из частиц антрацитового штыба (плотность частиц

1400 кг/м³, доля частиц размером до 1,5 мм – 88,36 %, доля частиц крупнее 1,5 мм – 11,64 %, причем доля частиц размером больше 4 мм – 1,59 %) и гранул из соломы (плотность 1190 кг/м³, диаметр 6 мм, отношение диаметра к средней длине гранулы – 0,59). Эксперименты проводились в аппарате поперечного сечения 185×495 мм при изменении высоты слоя в интервале 100...350 мм. Скорость воздуха измерялась на выходе из аппарата термоанемометром типа HD 2103-2 с зондом AP 471-S 3. Измерение перепада давления в слое производилось с помощью дифференциального микроанометра Testo-525. Импульсная трубка в виде иглы с внутренним диаметром 0,5 мм и длиной 60 мм размещалась в непосредственной близости от воздухораспределительной решетки. Микроанометр был соединен с иглой силиконовой трубкой внутренним диаметром 4 мм и длиной 200 мм. Цифровой сигнал от микроанометра Testo-525 подавался на персональный компьютер. Эксперимент продолжался 60 секунд, в течение которых перепад давления в слое измерялся 1200 раз.

Доля гранул в слое в каждом новом опыте последовательно увеличивалась с 10 до 100 %. Известно [12], что образование агломератов происходит из-за спекания частиц слоя с частицам биомассы. Поэтому, увеличение доли гранул соломы в слое моделировало увеличение количества агломератов при непрерывном вводе в слой свежих гранул.

В результате статистической обработки полученных данных по пульсации перепада давления в слое известными методами определялись: среднее значение перепада давления в слое за время наблюдения, среднеквадратичное отклонение пульсации перепада давления, безразмерная амплитуда пульсации перепада давления: математическое ожидание случайного процесса (среднее значение перепада давления в слое за время наблюдения):

$$P_m = \sum P_i / N, \quad (1)$$

среднеквадратичное отклонение пульсации пе-

репада давления

$$\sigma = [\sum (P_i - P_m)^2 / N]^{1/2}, \quad (2)$$

безразмерная амплитуда пульсации перепада давления:

$$\delta = \sigma / P_m. \quad (3)$$

На графиках (рис. 3) представлено изменение безразмерной амплитуды пульсации перепада давления в слое от содержания в смеси соломенных гранул и скорости воздуха, отнесенной к поперечному сечению пустого аппарата. Резкое уменьшение значений δ наблюдается при доле соломенных гранул в смеси ≥ 50 %. В этом случае, очевидно, происходит уменьшение частоты образования и разрушения газовых пузырей, что может привести к снижению подвижности частиц и, в конечном итоге, к дефлюидизации слоя.

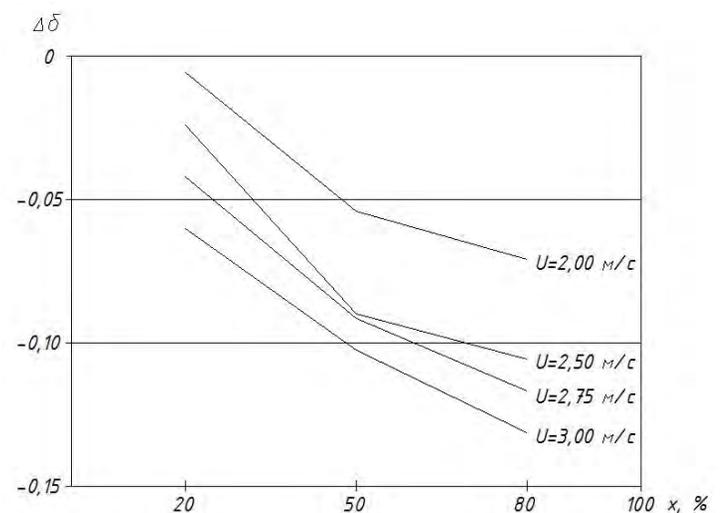


Рис. 3. Зависимость безразмерной амплитуды перепада давления в слое $\Delta\delta$ от содержания в смеси соломенных гранул при различных скоростях.

Необходимо отметить, что при наличии в слое от 50 % гранул и более, слой остается псевдооживленным и имеется время для создания условий повышения подвижности частиц в слое. Как следует из рис. 3, подвижность частиц может быть восстановлена или за счет

введения в слой дополнительной порции мелкодисперсного угля (или инертных частиц, т.е. частиц песка, к примеру) и снижения доли гранул или за счет увеличения числа псевдооживления, т.е. повышения скорости газа в слое. Очевидно, что второй вариант подавления дефлюидизации осуществить сложнее, т.к. увеличение скорости газа в слое при сжигании топлива возможно только за счет увеличения расхода дутьевого воздуха, что приведет к увеличению уноса топлива из слоя и росту потерь тепла с уходящими газами.

Предложенный метод диагностики процессов дефлюидизации в слое при сжигании в нем биомассы нуждается в уточнении и экспериментальной проверке, в частности, предстоит уточнить необходимую периодичность замеров пульсации перепада давления в слое.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (государственный контракт № П1661).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Lin W., Dam-Johansen K., Frandsen F.* Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors // *Chemical Engineering Journal*. – 2003. – 96. – p. 171–185.
2. *Öhman M., Nordin A., Skrifvars B.-J., Backman R., Hupa M.* Bed agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels // *Energy and Fuels*. – 2000. – 14. – p. 169–178.
3. *Olofsson G., Ye Z., Bjeri I., Andersson A.* Bed agglomeration problems in fluidized bed biomass combustion // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2002. – 41. – p. 2888–2894.
4. *Vesna B., Edgardo C.Z., Sarkki. J.* Prediction of agglomeration, fouling and corrosion tendency of fuels in CFB co-combustion // *20th International conference on fluidized bed combustion*. – 2009. – p. 416–421.
5. *Hiltunen M., Almark M.* Defluidization time of different materials in fluidized bed combustion // *Proceeding Swedish – Finnish Flame Days*. – 2005. – p. 28–36.
6. *Li S.Y., Teng H.P., Jiao W.H., Shang L.L., Lu Q.G.* Characterization on combustion and emission of several kind of herbaceous biomass pellets in a circulating fluidized bed combustor // *Proceeding on 20th International conference on fluidized bed combustion*. – 2009. – p. 1309–1315.
7. *Zhang J., Lü J., Wang X., Zhang H., Yue G., Suda T., Sato J.* Characterization of pressure signals in fluidized beds loaded with large particles using Wigner distribution analysis: diagnosis of agglomeration // *Chin. J. Chem. Eng.* – 2007. – 35 (1). – p. 24–29.
8. *Stankovič L., Stankovič S.* Wigner distribution of noisy signals // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1993. – vol. 41, no 1. – p. 956–960.
9. *Ommen van J.R., Coppens M.-O., Bleek C.M.* Early warming of agglomeration in fluidized bed by attractor comparison // *AIChE Journal*. – 2000. – vol. 46, no 11. – p. 2183–2197.
10. *Nijenhuis J., Korbee R., Lensselink J., Kiel J.H.A., Ommen van J.R.* A method for agglomeration detection and control in industrial fluidized bed // *Proceeding of CHISA 2004: 16th International congress of chemical and process engineering, August 22-26, 2004, Praha, Czech Republic*.
11. *Diks C., van Zwet W.R., Takens F., DeGoede J.* Detecting differences between delay vector distributions // *Physical Review E*. – 1996. – vol. 53, no 3. – p. 2169–2176.
12. *Lin W., Dam-Johansen K., Frandsen F.* Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors // *Chemical Engineering Journal*, 96 (2003).

Получено 18.02.2010 г.